N.° d'enregistrement
au C.N.R.S.

A.O. 6978

Article principal

recouvrant en tout

la THÈSE présentée

pour l'obtention

du grade de DOCTEUR ÈS-SCIENCES PHYSIQUES

À L'UNIVERSITÉ DE PARIS VI

par Monsieur Charles RIOU

Sujet de la thèse : ÉTUDE DE L'ÉVAPORATION EN AFRIQUE CENTRALE

soutenue le 1er juin 1972

devant la Commission d'examen composée de :

- M. P. QUENEY ..... Président
- M. L. GLANGEAUD ..... Examinateur
- M. P. de FELICE ..... Examinateur
- M. R.J. BOUCHET ..... Examinateur
- M. M. ROCHE ..... Examinateur

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41549217_0037

Etude de l'évaporation en Afrique Centrale

Ch. RIOU,

Résumé d'une thèse présentée à l'Université Paris VI pour obtenir le grade de docteur es sciences physiques.

ABSTRACT

The author describes works concerning the evaporation in the Central African zone including Central African Republic, Chad and Congo.

This study is composed of two parts, the first treats of the estimating process of evaporation, particularly in the field of the direct measure.

The second part shows the variations in time and space of the evaporation and its relations with the different encountering climates.

Cette thèse est le résumé de près de dix années de recherches au sein de la section d'hydrologie de l'O.R.S.T.O.M., au Tchad, en RCA et au Congo. Le but de ces recherches était de préciser le mécanisme de l'évaporation sous les différents climats rencontrés et d'y évaluer les quantités d'eau remises en jeu dans l'atmosphère.

Comme on le verra, une grande importance a été donnée à la méthodologie ; d'abord parce qu'il était nécessaire de s'appuyer sur des mesures et que celles-ci ne sont pas simples, ensuite parce qu'on ne peut tirer des conclusions pratiques des résultats que si la signification de la mesure est bien claire.

Un autre problème se pose aussi dans ces recherches, c'est celui du passage de résultats ponctuels à l'estimation de l'évaporation de grandes zones. A partir de quelques hypothèses simples, des valeurs de l'évapotranspiration réelle sont proposées pour les zones climatiques étudiées ; elles sont vérifiées globalement par les déficits d'écoulement obtenus par les études hydrologiques et permettent de mieux préciser quelques aspects des climats concernés.

1. LES CLIMATS DES ZONES ÉTUDIÉES.

Ces zones s'étendent du désert à l'équateur ; elles sont, en dehors de quelques régions bien localisées d'une altitude peu variable, et l'influence maritime y est faible. Le phénomène dominant y est la mousson ; ces caractères facilitent une étude sommaire des climats marquée par l'application du principe de continuité dans l'évolution dans l'espace des facteurs climatiques.

En zone aride une très bonne concordance peut être mise en évidence entre l'énergie solaire et la température moyenne de l'air. Il suffit pour cela de porter sur un graphique le rayonnement solaire tel qu'on peut le calculer à l'entrée de l'atmosphère pour une surface horizontale, et la température moyenne mesurée sous-abri, en prenant le mois comme unité de temps et en comparant le rayonnement solaire d'un mois avec la température du mois suivant, pour tenir compte du déphasage entre ces deux termes. Une relation linéaire très nette apparaît (fig. 1) ; elle est due au fait que le rayonnement global qui parvient au sol reste à peu près proportionnel toute l'année au rayonnement extra-atmosphérique. Plus au sud, l'influence de la mousson qui modifie les propriétés de l'atmosphère, se fait sentir en réduisant les températures des mois concernés. Pour exprimer cette influence de la mousson, on peut, du moins pour les premiers mois où la mousson s'exerce, choisir la hauteur de pluie mensuelle comme paramètre, et l'écart entre la valeur de la température et celle qu'elle prendrait en l'absence de mousson, déduite du rayonnement, peut alors lui être relié.

Ainsi, il semble bien que l'évolution de la température peut être complètement analysée en faisant intervenir ces deux éléments : l'énergie solaire extra-atmosphérique et la mousson (caractérisée par la hauteur de pluie) (fig. 2). On constate, par exemple,

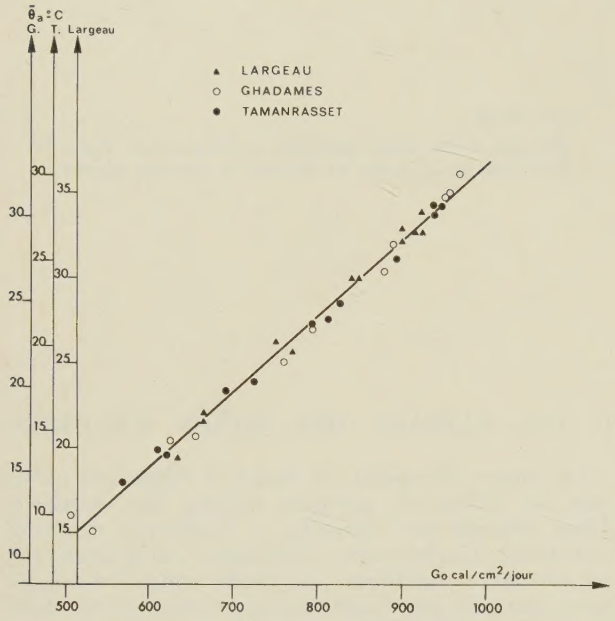


Fig. 1. — Température moyenne mensuelle et rayonnement solaire mensuel à l'entrée de l'atmosphère en zone désertique. (Déphasage d'un mois.)

qu'au sud du 10e parallèle, au Tchad, l'influence de la mousson s'étend sur les mois où les températures seraient les plus élevées d'après la marche du soleil ; cette zone est traditionnellement appelée « zone tropicale humide » et l'on remarque en effet que le caractère d'aridité n'y est plus dominant.

Inversement, l'analyse des régimes de températures rend bien compte de l'interaction des deux éléments prépondérants : l'énergie solaire disponible à l'extérieur de l'atmosphère et les propriétés de celle-ci, notamment la pluviosité.

Nous avons donc analysé les climats en considérant les températures mensuelles. Un procédé simple consiste à représenter sur un diagramme les températures moyennes minimales et maximales et à relier les points des mois consécutifs ; on obtient des climogrammes éloquents (fig. 3).

Pour simplifier cette représentation, on peut grouper les mois en saisons par des critères élémentaires : on considère les moyennes annuelles de la température maximale et minimale et on définit les saisons par rapport à ces moyennes : la saison fraîche comprendra les mois où les températures maximales et minimales

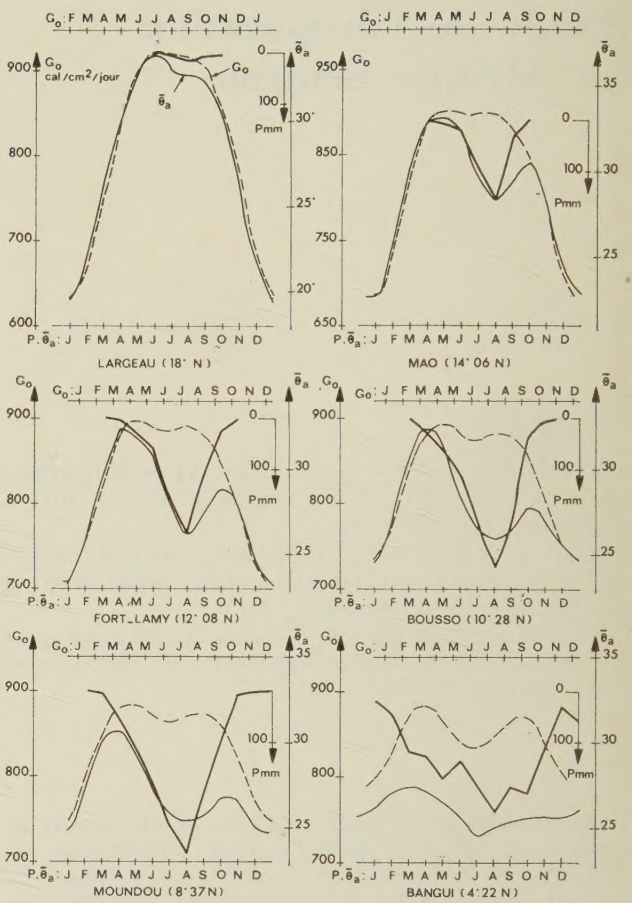


Fig. 2. — Variation mensuelle du rayonnement solaire G_O, de la température moyenne et de la pluie.

sont inférieures toutes deux aux valeurs annuelles, la saison chaude sera celle au contraire où ces températures leur seront supérieures. La saison où l'on a la température minimale supérieure à la moyenne annuelle correspondante alors que la température maximale lui est inférieure coïncide d'ailleurs avec la saison des pluies.

Une représentation synthétique de toute la zone étudiée fait apparaître quelques caractères qui permettent de mieux définir les zones climatiques qui nous intéressent. On distingue aisément (fig. 4) :

— Une zone désertique à deux saisons seulement, fraîche et chaude.

— Une saison à trois saisons bien marquées, fraîche, chaude et pluvieuse.

UNIV. LEIDEN BIBL.

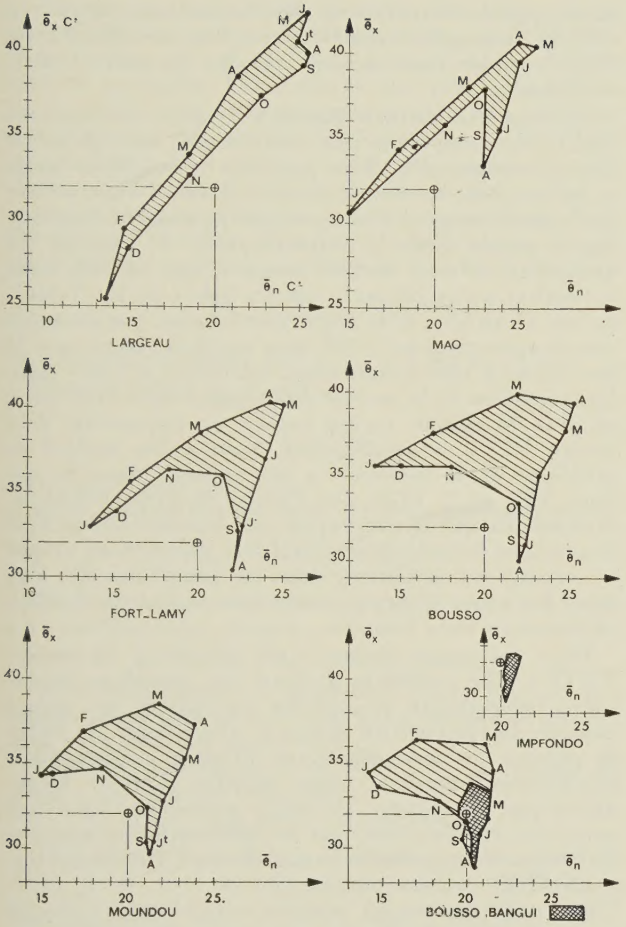


Fig. 3. — Climogrammes de quelques stations.
(Températures moyennes des maximums et des minimums.)

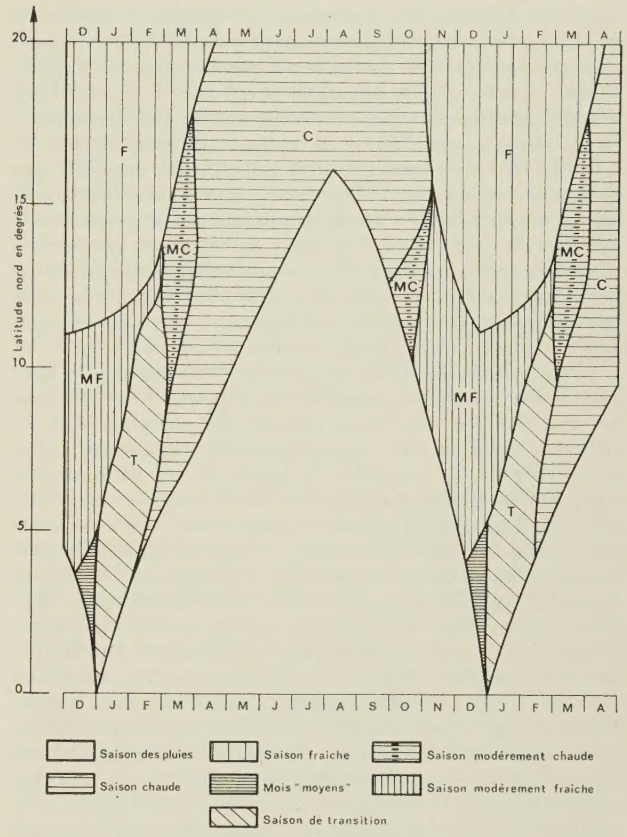


Fig. 4. — Les climats de la zone tropicale nord.
(Tchad, R.C.A., Congo Brazzaville.)

— Plus au sud la saison fraîche disparaît et il n'y a plus qu'une saison chaude et une saison pluvieuse, tandis que vers l'équateur tous les mois tendent à devenir semblables. Ces trois zones peuvent être appelées sahélienne, tropicale humide et équatoriale, en adoptant la terminologie classique.

Les facteurs qui conditionnent les températures marquent également profondément l'évaporation et, d'autre part les estimations de l'évapotranspiration réelle permettront de mieux préciser les climats en fournissant un critère d'humidité plus valable que la seule hauteur de pluie tombée.

A l'intérieur de ces différentes zones, les stations de mesure (décrites dans le volume VII nº 4, 1970, des *Cahiers d'hydrologie*) permettent de fournir les données nécessaires à cette étude, mais avant d'en faire état, il est indispensable de préciser quelques notions.

2. QUELQUES DÉFINITIONS.

L'évaporation est un phénomène qui fait intervenir un grand nombre de facteurs qu'on peut classer en trois catégories : ceux du climat (rayonnements, température, vent, humidité...), ceux de la surface évaporante (nature, forme, dimensions...) et ceux du volume qui se trouve sous la surface et qui échange avec celle-ci de l'eau dans le cas d'un sol et d'un couvert

végétal, suivant un mécanisme complexe, et de la chaleur. Ces deux derniers groupes de facteurs présentent une grande variation dans l'espace et dans le temps et leur étude complète implique le choix d'une échelle fournissant des renseignements précis et localisés mais d'une faible extension géographique. Le concept d'évapotranspiration potentielle ou ETP qui fait intervenir essentiellement les éléments climatiques permet au contraire des estimations à une toute autre échelle. Il postule en fait que, si l'eau est fournie en abondance à la surface, l'évaporation est uniquement, pour une surface donnée, fonction de l'énergie latente (pour la transformation eau liquide - eau vapeur) que peut fournir l'atmosphère au-dessus de la surface.

Ceci ne signifie pas que toutes les surfaces évaporantes ont la même évaporation, quand l'eau ne leur est pas limitée, car interviennent les propriétés de la surface, mais ce sont des propriétés physiques, telles que l'albédo, la rugosité, la forme et les dimensions. Une étude géographique de l'ETP portant sur une zone de grandes dimensions vise avant tout à caractériser les climats rencontrés et s'impose alors à l'esprit la notion de surface «standard» telle que les différentes mesures ne diffèrent qu'en fonction des climats. Une telle surface doit donc, entre autres caractères, avoir un albédo et une rugosité bien déterminés. En fait, le couvert végétal utilisé est nécessairement constitué par une plante se développant dans de bonnes conditions, facile à maintenir à une hauteur déterminée et à croissance continue ; les graminées répondent à ces impératifs et les évapotranspiromètres ont un couvert constitué par la graminée localement adaptée ; en zone sèche, ici le cynodon et en zone humide le paspalum. Ailleurs, il s'agit d'autres couverts, et l'on peut se demander si les différentes mesures d'ETP sont comparables. En ce qui concerne l'albédo, les différentes graminées utilisées ont, en général, des valeurs voisines de 0,20 mais sur les rugosités, il y a assez peu de données. Dans les stations du présent réseau, des comparaisons ont été faites entre le cynodon et le paspalum, sans qu'il apparaisse de différences entre les évaporations des deux couverts.

Le concept d'ETP est difficile à vérifier directement, car l'analyse physique complète du phénomène d'évaporation n'est pas aisé quand il s'agit d'un couvert végétal ; cependant, la liaison étroite entre l'évaporation d'une nappe d'eau libre et celle d'un couvert végétal qu'on retrouve même en zone aride, est un argument puissant en faveur de ce concept.

Nous avons réservé le nom d'ETP au résultat de la mesure obtenue en station, bien que cette notion soit valable pour n'importe quel couvert homogène de grande dimension, mais cette restriction simplifie les développements qui suivent. Quand il s'agit d'un autre type de couvert bien alimenté en eau, on parlera d'ETR maximale, laquelle peut être très proche de l'ETP, comme l'ont montré certains travaux (Audry, au Tchad).

En zone humide où le bac de 4 m² qui sert à mesurer l'ETP est inclus dans une vaste région bien pourvue d'eau, la notion d'ETP ne pose pas de problème, mais en saison sèche la mesure consiste d'abord à introduire une surface irriguée d'une certaine dimension dans une région privée d'eau la majeure partie de l'année. La dimension de cette surface irriguée joue un rôle dans le résultat qu'on obtient ; sur les bords du lac Tchad, un bac d'eau libre d'un mètre carré donne, par exemple une évaporation de 3 200 mm environ, alors que le lac Tchad a une évaporation inférieure à 2 300 mm. La dimension de la surface évaporante intervient donc en plus du climat, ce qui enlève, en apparence, à la notion d'ETP sa signification. Nous avons analysé ce problème et la méthode a été exposée dans le volume VII, n° 3, 1970, des *Cahiers de l'O.R.S.T.O.M.* Il en résulte que l'évaporation très sensible aux petites dimensions de la surface se stabilise rapidement et que les valeurs qu'on obtient dans les conditions des stations des zones sèches peuvent être comparées à celles obtenues en zone humide.

Dans les zones sèches, quel intérêt a la notion d'ETP ? Elle constitue d'abord une grandeur climatique intéressante puisqu'elle synthétise un grand nombre de facteurs du temps et elle permet en outre de prévoir des consommations d'eau de surfaces artificiellement humides, telles qu'elles seraient introduites par l'irrigation. Un autre argument important peut être avancé, c'est que les différentes estimations de l'évapotranspiromètre naturelle ou ETR font intervenir l'ETP comme paramètre.

Ces quelques points précisés, nous allons indiquer quels sont les différents procédés que nous avons utilisés pour estimer l'évaporation.

3. APPAREILS DE MESURE ET DIFFÉRENTS PROCÉDÉS D'ESTIMATION DE L'ÉVAPORATION.

Dans chaque station, il y a trois sortes de surfaces évaporantes, qui, toutes trois, disposent d'eau en abondance et qui sont de nature et de dimensions fort différentes : la première est la rondelle de papier buvard placé dans l'abri météorologique, l'évaporimètre de Piche, la deuxième est la nappe d'eau libre des bacs, la troisième est constituée par la pelouse de l'anneau de garde de l'évapotranspiromètre (400 m² minimum) dont on mesure l'évaporation au centre.

L'évaporimètre de Piche ne reçoit d'énergie que de l'air ambiant, puisque l'abri le protège du rayonnement solaire et que le rayonnement des parois de celui-ci est faible. Les mesures que nous avons faites le montrent bien et la température de la pastille est peu différente de celle du thermomètre mouillé. Peut-on malgré tout rattacher cette évaporation à celle d'une surface recevant le rayonnement solaire, c'est ce qu'ont entrepris quelques auteurs, notamment R. J. Bouchet. Si l'on part de la formule de Penman, on peut en effet écrire pour une surface de grande dimension :

$$E = \frac{\Delta\, Q/\mathscr{L} + \gamma\, E_a}{\Delta + \gamma}$$

Q est le rayonnement net et $E_a = f(u)\,(e_a - e_d)$

Pour le Piche, on aurait :

$$V = \frac{\gamma\, V_a}{\Delta + \gamma}$$

avec $V_a = g(u)\,(e_a - e_d)$
d'où la relation simple entre les deux évaporations :

$$E/V = \frac{\Delta\, Q/\mathscr{L}}{\gamma\, V_a} + \frac{E_a}{V_a}$$

Si Q est petit, comme Bouchet pense que c'est le cas en zone désertique, il reste :

$$E/V \not\equiv E_a/V_a = f(u)/g(u) = \text{cte}$$

Si la température de la surface évaporante est peu différente de celle de l'air (soit si les pertes par convection sont faibles), on a $E = E_a$.

Bouchet appelle $(\Delta + \gamma)\ V/\gamma = V_a$ la valeur du Piche « corrigée » et l'on a alors :

$$E/V_a = E_a/V_a = f(u)/g(u) \not\equiv \text{cte}$$

D'après ces hypothèses, il serait possible dans ces deux cas de tirer du « Piche » des données utilisables. En fait, dans la zone aride le rayonnement net n'est pas négligeable et en zone humide, de faibles valeurs de l'énergie convective suffisent à entraîner des variations importantes de E/V_a. Il faut noter, en effet, que des variations importantes dans l'humidité des masses d'air qui se déplacent dans la région étudiée, dues à la mousson ne s'accompagnent pas nécessairement de pluies et que rayonnement net (influencé par les variations d'humidité et de nébulosité) et sécheresse locale ne sont pas liées.

Il faut ajouter à cela l'extrême sensibilité de l'évaporimètre de Piche à la ventilation (suivant le type d'abri, l'évaporation Piche peut varier de 50%, ce qui limite ici l'intérêt d'un tel appareil).

3.1. L'ÉVAPOTRANSPIROMÈTRE.

Il exige certaines précautions notamment un anneau de garde suffisamment grand et bien irrigué, identique au couvert du bac et l'absence de discontinuité entre ces deux surfaces. Une autre cause de variation des résultats est la coupe de l'herbe ; des variations trop grandes de hauteur du gazon et dans le cas d'une coupe de diminution de la surface foliaire trop marquée, peuvent entraîner des variations de plus de $\pm$ 10% par rapport à la valeur moyenne de l'ETP. Par contre, grâce à des comparaisons entre un bac d'eau libre situé dans la pelouse et l'évapotranspiromètre, on a pu mettre en évidence que même pour les journées à très fortes évaporations en zone sèche, il n'y a pas d'effet réducteur sur l'évapotranspiration du gazon utilisé tel qu'un début de fermeture des stomates des feuilles le provoquerait.

En ce qui concerne la taille de l'anneau de garde en zone sèche, ce problème a déjà été mentionné.

3.2. LES BACS D'ÉVAPORATION.

Faciles à mettre en œuvre et se prêtant bien aux mesures, les bacs d'évaporation constituent la base des réseaux d'évaporation des USA, de l'URSS et de quelques autres pays. Ils ont aussi des adversaires dont les arguments ne sont pas toujours fondés.

Un des défauts qu'on lui reproche est d'être sensible au flux de chaleur échangé par les parois avec l'espace environnant ; si ceci est vrai pour les bacs au-dessus du sol, cela l'est beaucoup moins pour les bacs enterrés. Le bac du réseau O.R.S.T.O.M. dérive du bac colorado américain, il fait 1 m² de surface et 0,60 m de profondeur avec un rebord de 10 cm au-dessus du sol. Des essais effectués à Fort-Lamy ont montré qu'un tel bac garni sur les cinq faces enterrées de 16 cm de polystirène expansé et donc bien isolé du sol, ne voyait son évaporation diminuer que de 7% en saison chaude et sèche, diminution qui devient pratiquement nulle dès le début de la saison des pluies. Un autre défaut de ces bacs est le rebord qui joue un rôle sur la ventilation de l'eau. Il n'est guère possible de préciser cet effet ; ce qui ressort des résultats, c'est d'une part, la sensibilité de l'évaporation des bacs à la vitesse du vent, telle qu'elle apparaît quand on applique à un bac la formule de Dalton : $E = f(u)\,(e_s - e_d)$ (fig. 5), d'autre part, que la zone qui entoure le bac joue un rôle au moins aussi important que le rebord vis-à-vis du vent ; on retrouve ici cette notion d'*effet « d'hétérogénéité »* qui a déjà été évoquée (*Cahiers de l'O.R.S.T.O.M.*, volume VII, nº 4, 1970), et l'on peut dire que le véritable appareil de mesure n'est pas le bac, mais le bac + la surface environnante.

Par ailleurs, la faible dispersion des mesures entre plusieurs bacs identiques (*Cahiers de l'O.R.S.T.O.M.*, volume IV, nº 2, 1967) témoigne en faveur de cet appareil.

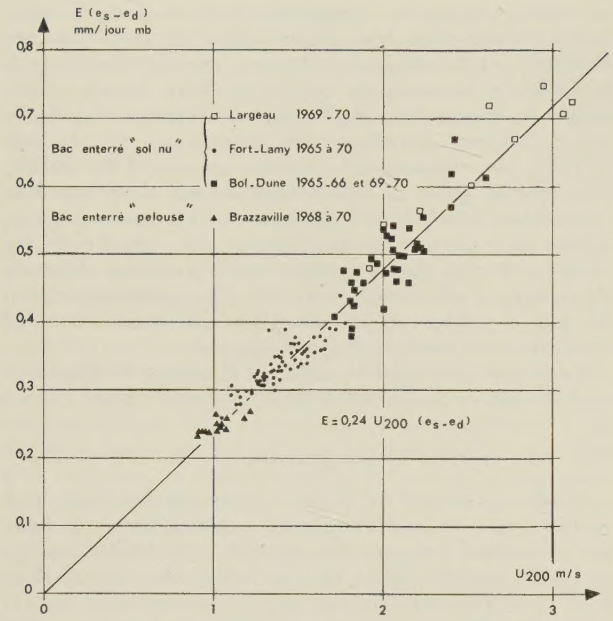


Fig. 5. — Comparaison du coefficient $E/(e_s-e_d)$ et de la vitesse du vent pour les bacs enterrés.

Partant de l'application de la loi de Dalton, valable même pour un bac enterré en sol nu en zone sèche, nous avons proposé un modèle rendant compte de l'évaporation des petites surfaces, qui a été exposé en détail dans un article précédent. La formule qui en résulte a été appliquée avec de bons résultats dans toute la zone étudiée et permet de relier l'E.T.P. à l'évaporation du bac. Cette formule explicite « les coefficients de bac» classiquement utilisés.

Le bac d'évaporation nous paraît donc un bon instrument de mesure, surtout s'il est enterré, étant entendu que plus il est grand, plus ses données seront faciles à utiliser. Le bac utilisé ici en réseau, permet néanmoins de fournir de précieuses données.

3.3. LA MESURE DES FLUX DE CHALEUR ET DE VAPEUR D'EAU.

L'appareil a été décrit dans un article précédent (*Cahiers de l'O.R.S.T.O.M.*, volume VII, n° 4, 1970) Sa réalisation à Brazzaville a été effectuée par R. Chartier. Son intérêt réside dans le fait qu'il mesure l'ETR, qu'il peut se déplacer facilement, ce qui est un avantage sur les lysimètres pesables (il peut notamment mesurer l'ETR des arbres), ses inconvénients sont la complexité des calculs qui nécessitent d'être automatisés.

3.4. LA MÉTHODE DU BILAN HYDROLOGIQUE.

Le bilan hydrique d'un bassin versant permet en déduisant l'écoulement de la pluie de faire apparaître un terme qui représente l'ETR, le drainage en profondeur et l'augmentation du stock d'eau des sols du bassin versant. Le bilan annuel rend le dernier terme négligeable et le drainage profond est souvent faible, si bien que les déficits d'écoulement peuvent fournir une valeur approchée de l'ETR annuelle. C'est en particulier une bonne vérification des autres méthodes.

3.5. LA MÉTHODE DU BILAN D'ÉNERGIE ET LA FORMULE DE PENMAN.

Ces méthodes ont été également décrites dans des articles précédents où l'on a vu, en particulier, la nécessité d'ajuster aux climats locaux les coefficients empiriques de la formule de Penman.

La comparaison du rayonnement net (un des éléments de la formule de Penman) et de l'ETP montre qu'en zone sèche l'énergie de l'évaporation est nettement supérieure au rayonnement net, alors qu'en zone humide, elle représente les 3/4 de cette énergie.

Pour évaluer l'ETP, la formule de Penman est utilisée en écrivant $ETP = fE_p$
où E_p représente l'évaporation calculée pour une nappe d'eau libre par la formule de Penman.

Les valeurs du coefficient f sont liées à la saison et à la latitude ; elles sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

ETP/E_p

	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	Année
Bol Matafo	0,75	0,69	0,81	0,85	0,88	0,82	0,78	0,72	0,75	0,86	0,84	0,75	0,80
Fort-Lamy	0,74	0,74	0,82	0,84	0,86	0,79	0,72	0,70	0,72	0,87	0,92	0,85	0,80
Ba-Illi	0,74	0,76	0,78	0,82	0,79	0,80	0,71	0,65	0,71	0,72	0,75	0,74	0,75
Bebedjia	0,71	0,69	0,74	0,85	0,75	0,78	0,82	0,79	0,77	0,76	0,67	0,70	0,75
Bangui	0,82	0,78	0,79	0,83	0,80	0,79	0,81	0,73	0,73	0,76	0,74	0,80	0,78
Brazzaville	0,84	0,81	0,79	0,77	0,75	0,74	0,71	0,70	0,73	0,73	0,74	0,80	0,75
Brazzaville	(Jt	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J)	

On voit qu'en saison fraîche et en saison des pluies, ce coefficient diminue et qu'il est maximum en saison chaude et sèche. Sa variation est cependant assez faible et une valeur constante de 0,80 en zone sèche et 0,75 en zone humide n'entraînerait pas de grosses erreurs sur l'ETP. Cette régularité est aussi une confirmation du concept d'ETP.

3.6. LES FORMULES EMPIRIQUES.

Leur critique a déjà été faite dans un article précédent (*Cahiers de l'O.R.S.T.O.M.*, volume IV, n° 2, 1967). Il se confirme que la formule de Turc et celle de Walker donnent des résultats acceptables en zone sèche, mais qu'elles surestiment nettement l'ETP en zone humide (20% en moyenne à Brazzaville, en ce qui concerne la formule de Turc). Quant à celle de Thornthwaite, elle fournit des répartitions mensuelles totalement aberrantes.

Il est possible de trouver des relations simples entre les éléments du climat et les valeurs moyennes de l'ETP, notamment en considérant la température maximale moyenne θ_x qui, dans la zone humide, peut servir à exprimer l'ETP de façon approchée par la formule :

$$\text{ETP mm/jour} = 0{,}30\ \theta_x\ ^oC - 5{,}9$$

Une autre méthode, en l'absence des éléments permettant de « corriger » les valeurs de l'évaporation des bacs pour obtenir l'ETP, consiste à leur appliquer des coefficients, fonction de la saison et de la latitude ; il s'agit ici de bacs enterrés en sol nu en zone sèche et placés dans une pelouse en zone humide.

ETP/E bac enterré de 1 m²

	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	Année
Zone sèche (Moy. Matafo, Fort-Lamy)	0,68	0,66	0,70	0,72	0,76	0,76	0,76	0,79	0,79	0,78	0,72	0,68	0,73
Zone intermédiaire (Moy. Ba-Illi, Bebedia)	0,74	0,71	0,72	0,80	0,80	0,87	0,88	0,90	0,88	0,82	0,74	0,75	0,80
Zone équatoriale (Moy. Bangui, Brazzaville)	0,89	0,91	0,92	0,94	0,96	0,93	0,96	0,90	0,92	0,94	0,92	0,91	0,92

D'une façon générale, les formules empiriques sont dangereuses, d'autant plus que beaucoup d'entre elles ont été mises au point sous des climats très différents de ceux de l'Afrique.

4. VALEURS DE L'ETP.

Elles sont indiquées dans le tableau suivant :

ETP mm/mois

	J	F	M	M	J	Jt	A	S	O	N	N	D	Année
Bol Matafo (1965-1970)	144	142	208	228	227	193	181	148	151	199	179	146	2146
Fort-Lamy (1964-1970)	130	144	192	193	198	166	139	119	130	171	158	136	1876
Ba-Illi (1965-1970)	127	136	166	168	161	145	121	105	113	125	121	125	1613
Bebedjia (1965-1970)	129	130	177	176	151	121	121	117	112	124	114	121	1590
Bangui (1966-1971)	95	105	129	129	114	97	89	91	96	100	98	96	1239
Brazzaville (1968-1971)	86	92	117	106	87	63	63	83	96	98	93	87	1071

En zone désertique, à Largeau, une estimation de l'ETP faite à partir du bac donne le même résultat que la formule de Penman et conduit à estimer l'ETP moyenne à 2 400 mm par an.

En zone sahélienne, on trouve à Abéché une estimation moyenne de 2 250 mm par an et on peut admettre que l'ETP annuelle est comprise entre 1 800 et 2 300 mm, les valeurs maximales se situent en avril et en octobre, les valeurs minimales en août (cœur de la saison des pluies) et en janvier (saison fraîche).

En zone tropicale humide, les fortes valeurs sont atténuées et d'août à janvier, l'ETP se stabilise autour de 120 à 130 mm/mois (fig. 6).

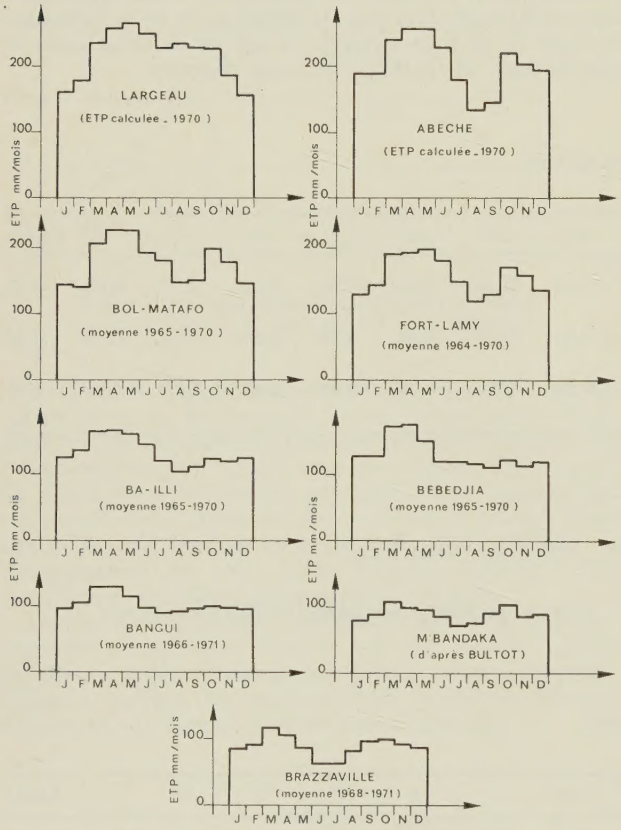


Fig. 6. — Variation mensuelle de l'E.T.P.

Enfin, en zone équatoriale, l'ETP mensuelle est voisine de 100 mm.

La variabilité de l'ETP annuelle est faible : à Fort-Lamy sur six années, l'écart maximum par rapport à la moyenne interannuelle est de + 5%. En ce qui concerne les valeurs mensuelles, on constate qu'on ne dépasse guère ± 10% sur 5 ans. Les valeurs extrêmes enregistrées sur des périodes décadaires sont de 86 mm à Bol-Matafo, valeur qu'on retrouve à Fort-Lamy. En zone tropicale humide, on enregistre une valeur décadaire maximale de 67 mm à Ba-Illi, tandis qu'à Bangui, elle ne dépasse pas 51 mm et à Brazzaville 42 mm.

La comparaison de l'ETP et de la hauteur de pluie annuelle montre que les deux courbes se coupent vers 6° de latitude et 1 350 mm de pluie, ce qui ne signifie pas qu'à ce point les besoins en eau soient satisfaits, la répartition de la pluie intervenant notamment (fig. 7).

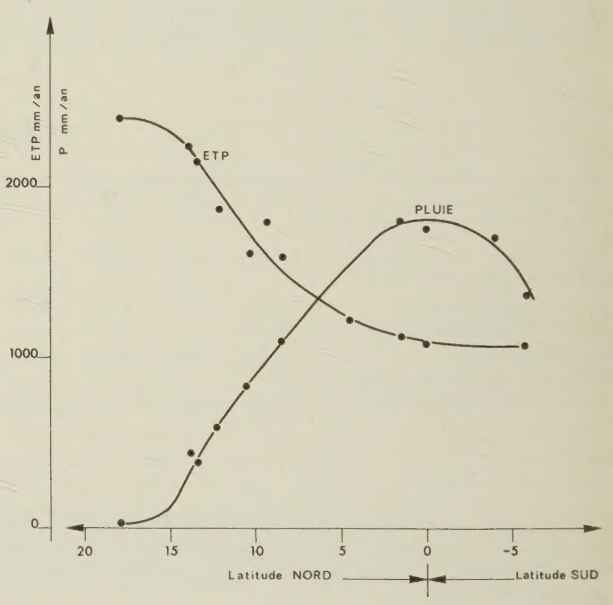


Fig. 7. — Variation comparée de l'E.T.P. et de la pluie annuelles selon la latitude (entre 15° et 22° de longitude environ).

Il reste maintenant à essayer d'analyser l'évapotranspiration naturelle.

5. ESSAI D'ÉVALUATION DE L'ETR.

Dans cette partie de l'Afrique, la pluie tombe en une saison bien définie et cette particularité rend plus aisée l'analyse de l'ETR. On peut en effet distinguer trois phases bien distinctes :

— Le début de la saison des pluies. La pluie y reste inférieure à l'ETP, en zone sèche, les premières pluies tombent sur le sol nu et la végétation apparaît ensuite ; il semble fondé d'admettre que seule l'eau étant facteur limitant de l'évaporation, toute la pluie est évaporée, autrement dit ETR = Pluie.

— Par la suite, la pluie devient rapidement supérieure à l'ETP, celle-ci est maintenant le facteur limitant de l'évaporation et l'on peut écrire : ETR = ETR maximale.

— Enfin, la pluie diminue et disparaît alors que persiste une certaine réserve d'eau dans le sol ; c'est l'importance de cette réserve qui va être le facteur limitant de l'évaporation. Cette dernière phase est la plus complexe, car elle fait intervenir les facteurs du climat, ceux du sol et le type de couvert. Nous l'avons étudié dans un cas : celui d'une pelouse à Brazzaville et les résultats de cette étude ont été indiqués dans un article antérieur (*Cahiers de l'O.R.S.T.O.M.*, volume VII, n° 4, 1970). La formule trouvée, bien que déduite d'un seul cas nous a paru pouvoir s'appliquer ailleurs et nous l'avons utilisée dans la zone étudiée. Il restait à évaluer les réserves en eau des sols, évaluation sans grande signification et que nous avons éludée en prenant trois valeurs : 150 mm, 225 mm et 300 mm qui ont des chances d'encadrer la plupart des cas.

Une autre difficulté d'une telle étude est le passage de résultats obtenus en station à l'estimation de ce qui se passe pour des zones plus vastes. Les trois types de facteurs qui interviennent, ceux du climat, ceux de la surface évaporante, ceux du sol ne sont pas obtenus à des échelles identiques. Prenons d'abord les facteurs du climat ; on peut distinguer ceux qui sont valables à l'échelle du climat général comme le rayonnement global, ceux qui comme la température et la pression de vapeur d'eau sont mesurées dans l'abri météorologique et définissent ce qu'on peut appeler le mésoclimat, d'autres enfin comme la température de surface où même le vent dépendent du site de la station. Pour ces facteurs, il est relativement aisé de voir si la station est représentative de la zone environnante (mésoclimat) et si cette dernière ne présente pas des caractères particuliers par rapport au climat général ; l'utilisation des climogrammes décrits précédemment permet de mettre en évidence ces caractères. On constate ainsi que les mésoclimats de Bol-Matafo et de Ba-Illi sont plus frais et plus humides que le climat général, ce qui est sans doute dû à l'influence pour l'un de la zone des polders de Bol et pour l'autre des plaines d'inondations du Logone et du Chari.

En ce qui concerne les autres facteurs, il est clair que leur hétérogénéité est beaucoup plus grande et qu'il est difficile d'obtenir dans l'espace des valeurs de l'albédo et de la rugosité ou de la réserve en eau exploitable. Nous avons donc établi en fait des estimations de l'ETR pour un gazon tel que celui de l'évapotranspiromètre en posant ETR maximale = ETP, seule la réserve en eau est variable et fixée à trois valeurs indiquées. Cette méthode est en partie justifiée par le fait que l'albédo varie assez peu et qu'il est relativement facile de corriger les valeurs obtenues en se donnant d'autres valeurs de ce paramètre. En ce qui concerne les variations de rugosité, les données sont si peu nombreuses et si peu cohérentes qu'il est difficile de la faire intervenir. Enfin, les travaux d'Audry sur une savane au Tchad aboutissent à une estimation d'ETR max. proche de l'ETP, tandis que les déficits d'écoulement des hydrologues sont très proches des valeurs que nous proposons.

La méthode indiquée conduit à des résultats qui montrent que dans la zone sahélienne, toute la pluie est pratiquement évaporée. Seuls quelques accidents dans le temps (pluviosité exceptionnelle) ou dans

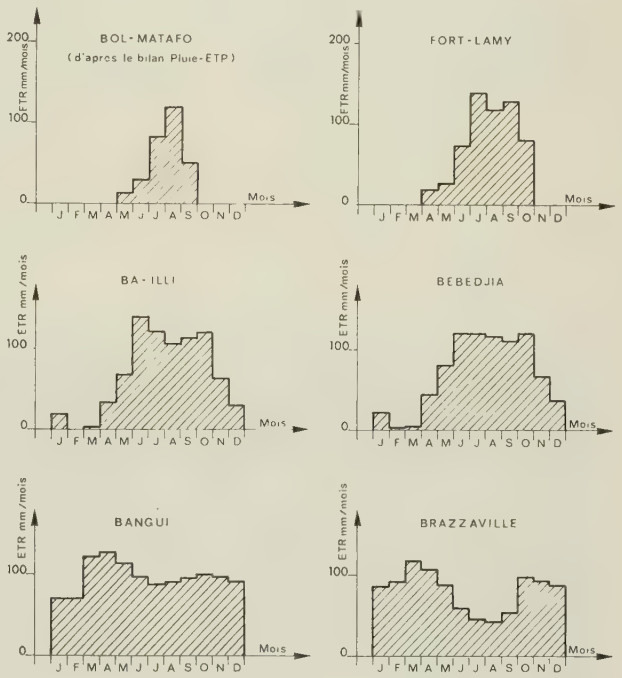


Fig. 8. — Variation mensuelle moyenne de l'E.T.R. pour quelques stations (la réserve en eau utilisable ne pouvant dépasser 225 mm).

l'espace (faible réserve en eau ou concentration des eaux de pluie) peuvent permettre le drainage en profondeur. Celui-ci devient possible dans la zone tropicale humide et il peut atteindre 300 mm à Bébédjia. En approchant la zone équatoriale, on constate que l'ETR devient pratiquement indépendante de la réserve en eau du sol et tend vers l'ETP (fig. 8).

La variation de l'ETR annuelle suivant la latitude montre qu'un maximum se situe vers 4° de latitude et que c'est vers ce point que les besoins en eau de la végétation sont satisfaits (fig. 9).

Ces résultats permettent également de mieux préciser une notion qui reste assez floue, celle de mois humide ; après d'autres auteurs, nous avons adopté un critère commode en classant les mois selon que l'ETR y est inférieure ou non à ETP/2. Cette distinction complète ainsi les caractères déjà mentionnés des différents climats.

Ainsi l'étude détaillée des appareils, et de la signification des données qu'ils fournissent permet de mieux définir les grandeurs obtenues, la caractérisation des climats et la définition des différentes échelles permettent de mieux situer les résultats. Il est alors possible d'esquisser les variations dans le temps et dans l'espace de l'évapotranspiration potentielle et de l'évapotranspiration réelle.

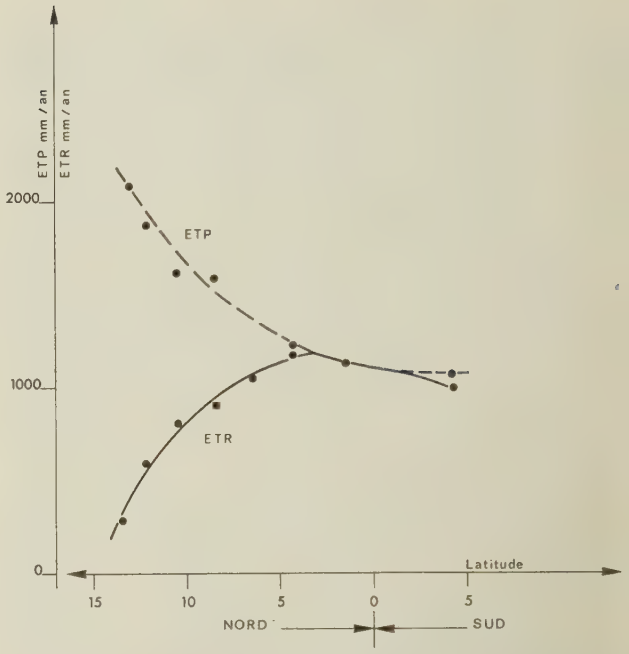
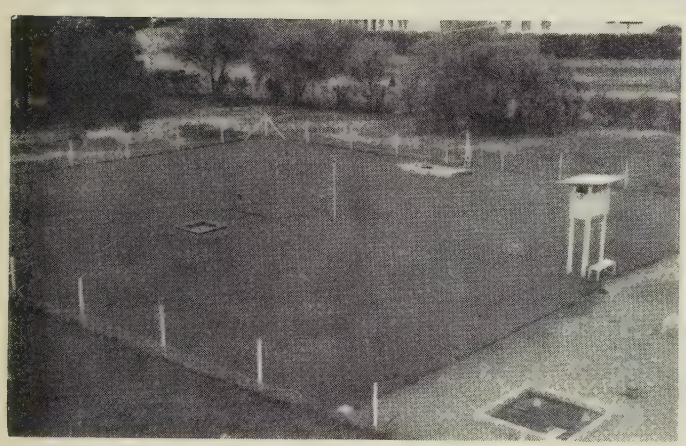


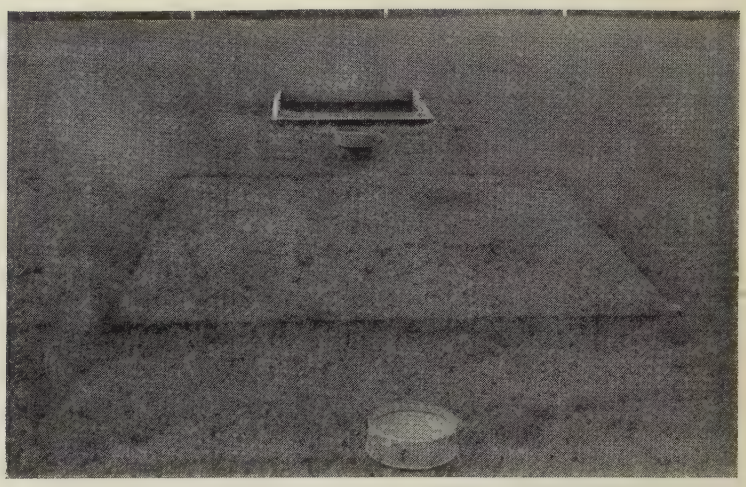
Fig. 9. — Variation de l'E.T.P. et de l'E.T.R. annuelles en fonction de la latitude (entre 15° et 22° de longitude).

Vue générale de la station de Brazzaville.

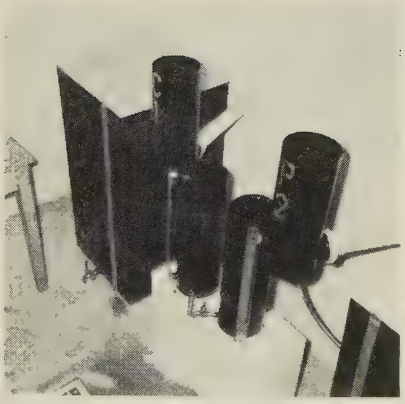


La pelouse de la station de Fort Lamy.

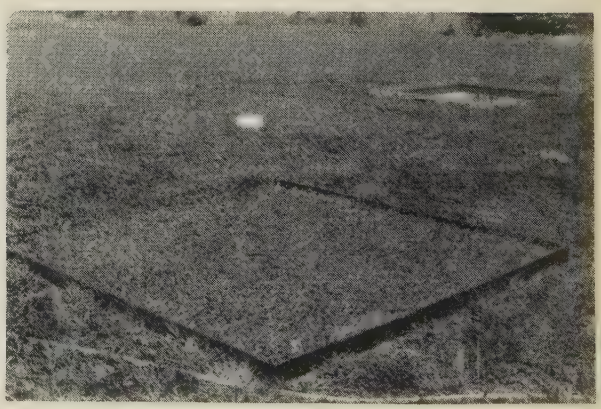
La parcelle sol nu de la station de Fort Lamy, et les bacs.



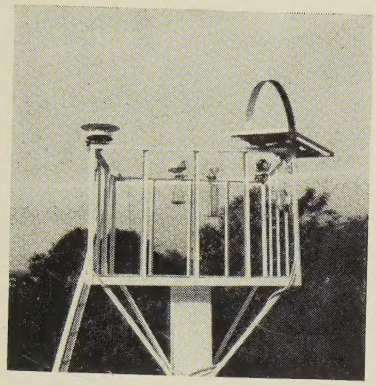
Station de Fort Lamy.
L'évapotranspiromètre (cynodon) et le bac enterré de 1 m².



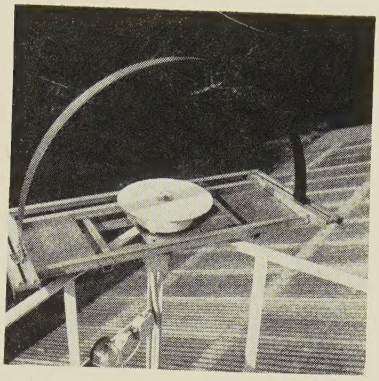
La fosse de drainage de Brazzaville.



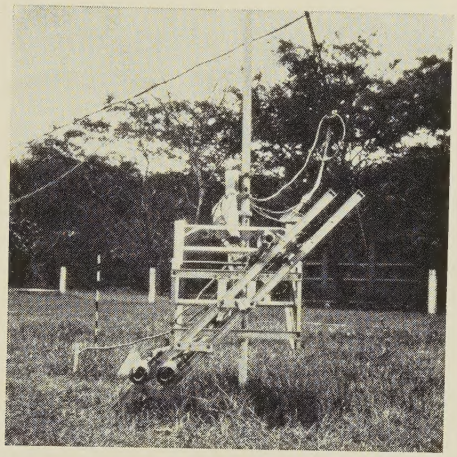
Station de Brazzaville.
Un des évapotranspiromètres (paspalum) et le bac enterré de 4 m².



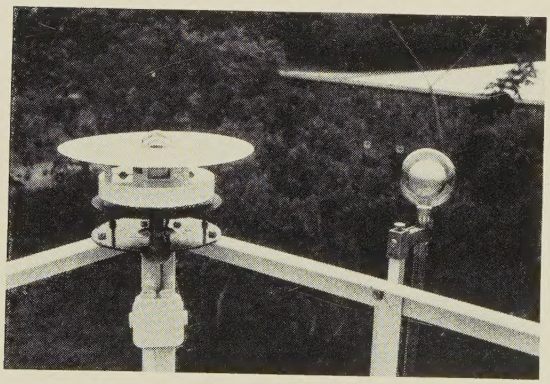
La plate-forme de la tour et les appareils.



Mesure du rayonnement diffus.



Mesure des flux de chaleur et de vapeur d'eau.



Mesure du rayonnement global (Pile de Kipp et « Bellani »).